

*silnik indukcyjny, estymacja zmiennych stanu,
układ bezczujnikowy*

Jacek LISTWAN*, Mateusz DYBKOWSKI*, Krzysztof PIEŃKOWSKI*

ANALIZA WRAŻLIWOŚCI WYBRANYCH ESTYMATORÓW ZMIENNYCH STANU NA BŁĘDNĄ IDENTYFIKACJĘ PARAMETRÓW SCHEMATU ZASTĘPCZEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO

Przedstawiono analizę wrażliwości wybranych estymatorów odtwarzających wartości wektora strumienia sprzężonego wirnika i prędkości kątowej silnika indukcyjnego klatkowego na błędną identyfikację wartości parametrów schematu zastępczego silnika. Weryfikacja działania tych estymatorów została przeprowadzona z wykorzystaniem przekształtnikowego układu sterowania silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metody DTC-SVM. Przekształtnikowy układ sterowania silnikiem i układy wybranych estymatorów zostały zamodelowane w środowisku Matlab-Simulink. Badano wpływ błędnej identyfikacji wartości rezystancji stojana, rezystancji wirnika oraz reaktancji magnesowania silnika przy różnych wartościach prędkości kątowej układu napędowego. Wyniki przeprowadzonych badań i analiz pozwalają na racjonalny wybór estymatorów zmiennych stanu stosowanych w bezczujnikowych układach sterowania silników indukcyjnych.

1. WPROWADZENIE

We współczesnych układach napędowych powszechnie są stosowane przekształtnikowe układy sterowania silników elektrycznych. Ze względu na prostotę konstrukcji, dużą niezawodność pracy, niskie koszty produkcji i eksploatacji oraz inne względy jako silniki napędowe stosowane są najczęściej silniki indukcyjne klatkowe. Obecnie rozwijane są przekształtnikowe układy sterowania częstotliwościowego tych silników oparte na różnych metodach sterowania. W algorytmach sterowania dotyczących tych metod konieczna jest znajomość wybranych zmiennych stanu oraz parametrów układu napędowego. Te zmienne stanu można podzielić

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: jacek.listwan@pwr.wroc.pl, mateusz.dybkowski@pwr.wroc.pl, krzysztof.pienkowski@pwr.wroc.pl

na mierzalne oraz na niemierzalne lub trudno mierzalne. Mierzalne zmienne stanu mogą być wyznaczone przez zastosowanie odpowiednich czujników pomiarowych, natomiast do wyznaczania niemierzalnych lub trudno mierzalnych zmiennych stanu stosowane są często metody odtwarzania tych zmiennych za pośrednictwem odpowiednich technik estymacji.

Zastosowanie czujników pomiarowych do bezpośredniego pomiaru zmiennych stanu ma wpływ na pogorszenie niezawodności pracy układu napędowego oraz powoduje zwiększenie kosztów wykonania i eksploatacji napędu. W związku z tym poszukiwane są układy sterowania pozwalające na wyeliminowanie pewnej liczby czujników pomiarowych i utworzenie tzw. napędów bezczujnikowych. Powszechną tendencją w układach napędowych jest dążenie do eliminacji mechanicznych czujników pomiarowych, co najczęściej prowadzi do eliminacji czujnika prędkości kątowej silnika. Eliminacja lub ograniczenie liczby czujników pomiarowych, a przez to liczby zmiennych stanu wyznaczanych pomiarowo powoduje konieczność zastosowania odpowiednich estymatorów, odtwarzających wybrane zmienne stanu [4]–[6], [9], [10].

Największe zastosowanie znajdują obecnie metody algorytmiczne odtwarzania zmiennych stanu układu napędowego. Metody algorytmiczne są oparte na wykorzystaniu równań modeli matematycznych silnika indukcyjnego oraz odpowiednich metod i algorytmów przetwarzania sygnałów, sformułowanych na podstawie teorii sterowania. Ogólny podział metod algorytmicznych wyróżnia metody z zastosowaniem symulatorów zmiennych stanu, obserwatorów zmiennych stanu i filtru Kalmana. Obecnie najczęściej są rozwijane i stosowane metody z wykorzystaniem symulatorów zmiennych stanu [4], [9], [10].

Istotną wadą algorytmicznych metod odtwarzania zmiennych stanu jest ich znaczna wrażliwość na zmiany wartości parametrów elektromagnetycznych przyjmowanych w modelach matematycznych silnika indukcyjnego. W pracy tej przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących analizy wrażliwości wybranych algorytmicznych metod odtwarzania zmiennych stanu na błędną identyfikację parametrów elektromagnetycznych schematu zastępczego silnika indukcyjnego.

2. MODEL MATEMATYCZNY SILNIKA INDUKCYJNEGO

W badaniach symulacyjnych wykorzystano model obwodowy silnika indukcyjnego klatkowego sformułowany przy uwzględnieniu powszechnie stosowanych założeń upraszczających [9]: symetria magnetyczna i elektryczna obwodów silnika, liniowość obwodu magnetycznego silnika, pominięcie wpływu wyższych harmonicznych i prądów wirowych. Przyjęto, że uzwojenie klatkowe wirnika jest sprowadzone do zastępczego uzwojenia 3-fazowego o parametrach przeliczonych na stronę uzwojenia stojana.

Równania modelu matematycznego silnika indukcyjnego dla zmiennych fazowych zostały przekształcone do równań wyrażonych przez zmienne wektorowe. Wektory przestrzenne wielkości elektromagnetycznych są rozpatrywane we wspólnym dla obwodów stojana i wirnika prostokątnym układzie współrzędnych, wirującym z dowolnie zadaną prędkością kątową. Wszystkie wielkości elektromagnetyczne i parametry silnika zostały wyrażone w postaci względnej.

Równania modelu matematycznego silnika indukcyjnego klatkowego przedstawia następujący układ równań wektorowych:

- równania napięciowe stojana i wirnika:

$$\mathbf{u}_{sk} = r_s \mathbf{i}_{sk} + T_N \frac{d}{dt} \Psi_{sk} + j\omega_k \Psi_{sk}, \quad (1)$$

$$0 = r_r \mathbf{i}_{rk} + T_N \frac{d}{dt} \Psi_{rk} + j(\omega_k - \omega_m) \Psi_{rk}; \quad (2)$$

- równania strumieniowo-prądowe stojana i wirnika:

$$\Psi_{sk} = x_s \mathbf{i}_{sk} + x_m \mathbf{i}_{rk}, \quad (3)$$

$$\Psi_{rk} = x_r \mathbf{i}_{rk} + x_m \mathbf{i}_{sk}; \quad (4)$$

- równanie momentu elektromagnetycznego silnika:

$$m_e = \text{Im}\{\Psi_{sk}^* \mathbf{i}_{sk}\}; \quad (5)$$

- równanie ruchu:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{T_M} (m_e - m_o) \quad (6)$$

gdzie:

$$T_N = \frac{1}{\Omega_b} = \frac{1}{2\pi f_{sN}}, \quad T_M = \frac{J\Omega_b}{p_b M_b}, \quad x_s = x_{\sigma s} + x_m, \quad x_r = x_{\sigma r} + x_m \quad (7)$$

gdzie:

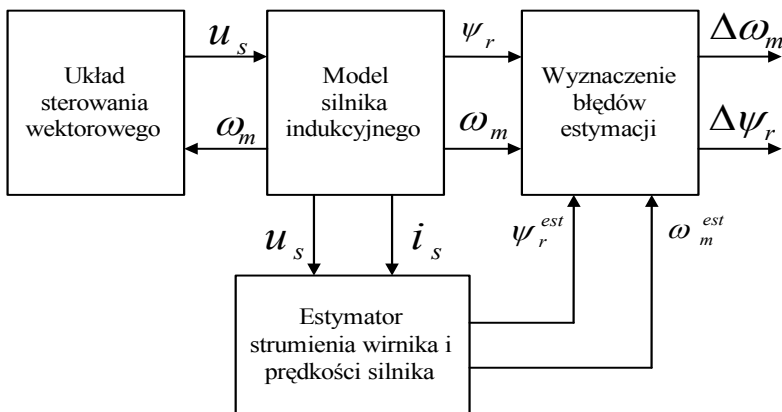
- \mathbf{u}_{sk} – wektor napięcia stojana,
- $\mathbf{i}_{sk}, \mathbf{i}_{rk}$ – odpowiednio wektor prądu stojana i wirnika,
- Ψ_{sk}, Ψ_{rk} – odpowiednio wektor strumienia sprzężonego stojana i wirnika,
- m_e, m_o – odpowiednio moment elektromagnetyczny silnika i moment mechaniczny,
- ω_k, ω_m – odpowiednio prędkość kątową wirowania układu współrzędnych i prędkość kątową mechaniczną,

- p_b – liczba par biegunów silnika,
 r_s, r_r – odpowiednio rezystancja fazowa uzwojenia stojana i wirnika,
 x_s, x_r – odpowiednio całkowita reaktancja uzwojenia stojana i wirnika,
 $x_{\sigma s}, x_{\sigma r}$ – odpowiednio reaktancja rozproszenia uzwojenia stojana i wirnika,
 x_m – reaktancja magnesowania silnika,
 J – moment bezwładności układu napędowego,
 T_M – mechaniczna stała czasowa układu napędowego,
 t – czas,
 k – indeks dla oznaczenia wielkości elektromagnetycznych wyrażonych w układzie współrzędnych wirującym z dowolnie zadaną prędkością kątową ω_k ,
 b – indeks dla oznaczenia wielkości bazowych.

3. METODA BADAŃ WRAŻLIWOŚCI WYBRANYCH ALGORYTMÓW ODTWARZANIA ZMIENNYCH STANU

3.1. OPIS METODY BADAŃ

Badania wrażliwości algorytmów odtwarzania zmiennych stanu zostały przeprowadzone z zastosowaniem metod symulacyjnych. Ocena wrażliwości algorytmów odtwarzania zmiennych stanu była dokonywana na podstawie wyznaczenia błędów estymacji wybranych zmiennych stanu. Schemat ogólny metodyki badań i wyznaczania błędów estymacji zmiennych stanu przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Schemat ogólny metodyki wyznaczania błędów estymacji

Podczas badań symulowano wybrany układ sterowania wektorowego silnikiem indukcyjnym klatkowym z zastosowaniem modelu matematycznego silnika i wybranej struktury układu sterowania. W modelu matematycznym silnika indukcyjnego były przyjęte znamionowe wartości parametrów elektromagnetycznych silnika. Opis matematyczny układu sterowania wektorowego silnika był oparty na założeniu, że dostępne są pomiarowo wszystkie wymagane zmienne stanu. Nastawy regulatorów w układzie sterowania zostały dobrane z uwzględnieniem tych założeń oraz z zastosowaniem odpowiednich kryteriów doboru regulatorów. Do zamodelowanej w ten sposób struktury wektorowego sterowania silnika indukcyjnego był dołączany model symulacyjny wybranego estymatora zmiennych stanu silnika. Przyjęto, że wybrany układ estymatora pracuje w układzie otwartym i jest pobudzany tylko sygnałami otrzymywanymi z modelu symulacyjnego układu sterowania wektorowego silnika indukcyjnego. Zmienne stanu wyznaczone przez estymator nie były więc wykorzystywane w układzie sterowania silnikiem.

W badaniach symulacyjnych dotyczących wrażliwości algorytmów odtwarzania zmiennych stanu dokonywano celowych zmian wartości parametrów schematu zastępczego silnika tylko w modelu matematycznym estymatora, natomiast parametry modelu matematycznego silnika i układu sterowania nie były zmieniane. Pozwoliło to na wyeliminowanie ewentualnego wpływu zmiennych stanu silnika i nastaw regulatorów na działanie estymatorów zmiennych stanu. Ocena wrażliwości wybranego algorytmu odtwarzania zmiennych stanu była dokonywana na podstawie wyznaczania odchyłek względnych między wartościami zmiennych stanu wyznaczonych z symulacji wektorowego układu sterowania silnika i z symulacji estymatora odtwarzającego odpowiednie zmienne stanu silnika. Odchyłki te były obliczane dla kolejnych kroków obliczeniowych podczas symulacji układu sterowania wektorowego silnika i wybranego estymatora, a następnie uśredniane. Wartości średnie tych odchyłek były przyjmowane jako błędy odtwarzania zmiennych stanu przez estymator.

Głównym przedmiotem badań było określenie wrażliwości wybranych estymatorów przy odtwarzaniu dwóch podstawowych zmiennych stanu: wektora strumienia sprzężonego wirnika oraz prędkości kątowej silnika napędowego. Błąd względny odtwarzania modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika i prędkości kątowej silnika określano z następujących zależności:

$$\Delta \psi_r = \frac{\sum_{i=1}^N |\psi_r - \psi_r^{est}| / \psi_r}{N} \cdot 100\% , \quad (8)$$

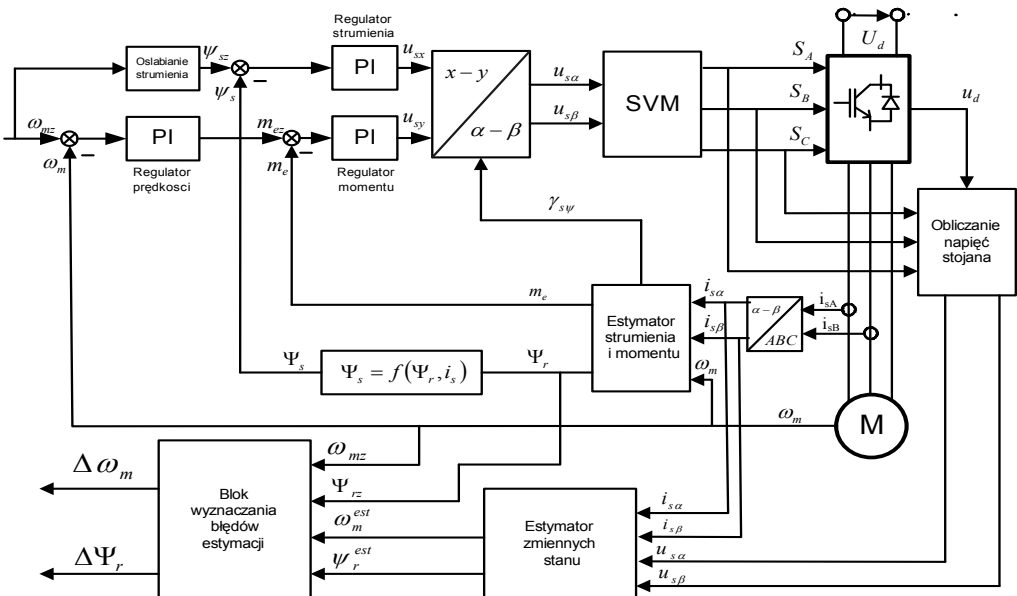
$$\Delta \omega_m = \frac{\sum_{i=1}^N |\omega_m - \omega_m^{est}| / \omega_m}{N} \cdot 100\% \quad (9)$$

gdzie:

- ψ_r, ψ_r^{est} – odpowiednio obliczona w danym kroku obliczeniowym wartość modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika z symulacji układu sterowania wektorowego silnika i z symulacji układu estymatora,
- ω_m, ω_m^{est} – odpowiednio wartość prędkości kątovej silnika wyliczona w danym kroku obliczeniowym z symulacji układu sterowania wektorowego silnika i wartość estymowanej prędkości kątovej silnika,
- N – liczba próbek (pomiarów) określonych dla danego przebiegu symulacji.

3.2. OPIS PRZEDMIOTU BADAŃ

Do badań wrażliwości estymatorów do odtwarzania zmiennych stanu przyjęto układ napędowy z silnikiem indukcyjnym klatkowym sterowanym z zastosowaniem metody DTC-SVM. Schemat przekształtnikowego układu sterowania silnika indukcyjnego z uwzględnieniem bloków regulacji DTC, modulatora SVM oraz bloków estymatorów i obliczania błędów estymacji przedstawiono na rys. 2. Podstawową zaletą układu sterowania DTC-SVM w porównaniu do klasycznej metody DTC z regulatorami histerezowymi jest możliwość zapewnienia stałej zadanej częstości przełączeń zaworów energoelektronicznego falownika, a przez to ograniczenie strat mocy i możliwość racjonalnego doboru falownika.



Rys. 2. Schemat układu sterowania DTC-SVM silnika indukcyjnego z układem estymatora i blokiem wyznaczania błędów estymacji

W badaniach wrażliwości odtwarzania zmiennych stanu rozpatrywano następujące algorytmiczne układy silnika indukcyjnego klatkowego:

- estymator adaptacyjny $MRAS^F$ [4], [9];
- estymator adaptacyjny $MRAS^{CC}$ [2]–[4], [6], [9], [11]–[13];
- estymator ślizgowy SMO [2], [12]–[14];
- estymator $SFSO$ [1], [2], [12], [13];
- estymatora Ohtani'ego [8];
- obserwator pełnego rzędu z adaptacją prędkości NFO^4 [9].

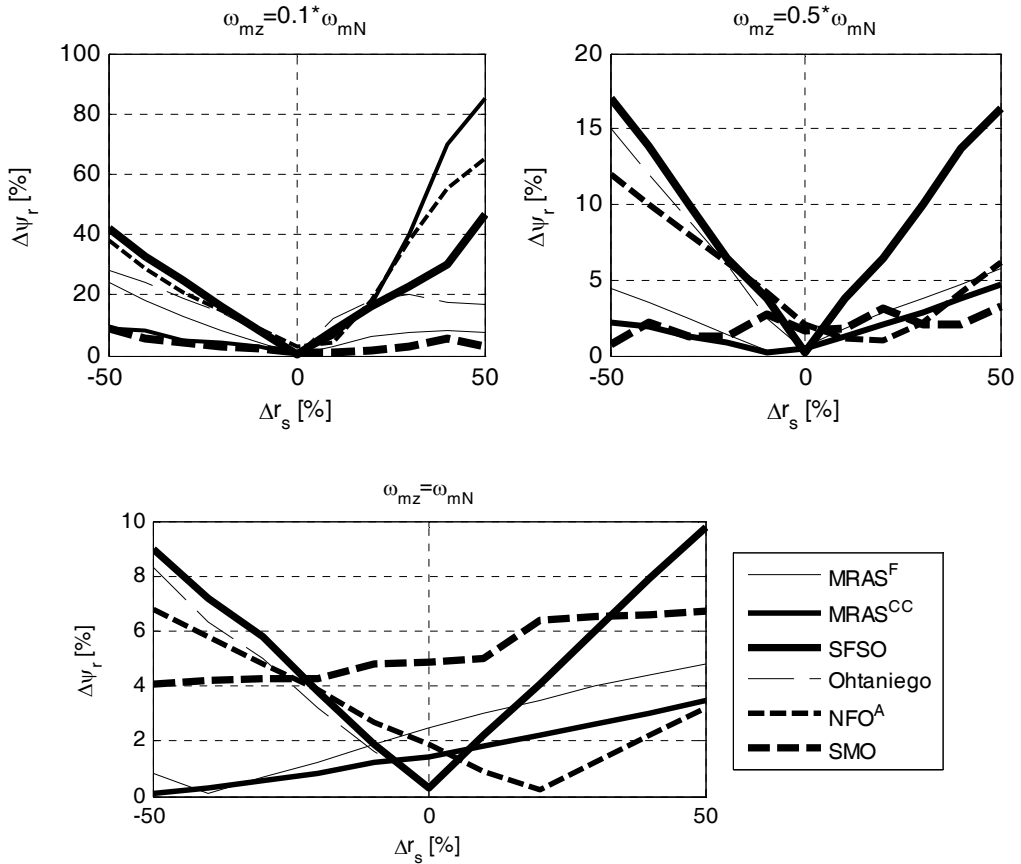
Badania zostały wykonane dla układu napędowego z trakcyjnym silnikiem indukcyjnym klatkowym o następujących danych znamionowych: $P_N = 50$ kW, $U_{fN} = 380$ V, $I_{fN} = 88$ A, $f_N = 65$ Hz, $n_N = 1917$ obr./min., $p_b = 2$. Wartości znamionowe parametrów elektromagnetycznych silnika indukcyjnego są równe: $R_s = 0,645$ Ω , $R_r = 0,463$ Ω , $X_s = 10,299$ Ω , $X_r = 10,266$ Ω , $X_m = 10,108$ Ω .

Analiza wrażliwości poszczególnych układów odtwarzania zmiennych stanu została przeprowadzona przy założeniu stałej wartości momentu obciążenia mechanicznego równego 0.1 [p.u.]. Badania przeprowadzono dla wartości względnych zadawanych prędkości kątowych silnika równych odpowiednio: 0,1, 0,5 i 1,0 [p.u.]. W badaniach przyjęto, że w modelach symulacyjnych układów odtwarzania zmiennych stanu parametry elektromagnetyczne silnika charakteryzuje następujący zakres zmienności parametrów: wartości rezystancji uzwojenia stojana i wirnika oraz reaktancji magnesowania mogą zmieniać się w zakresie 0,5÷1,5 wartości znamionowej[7].

4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

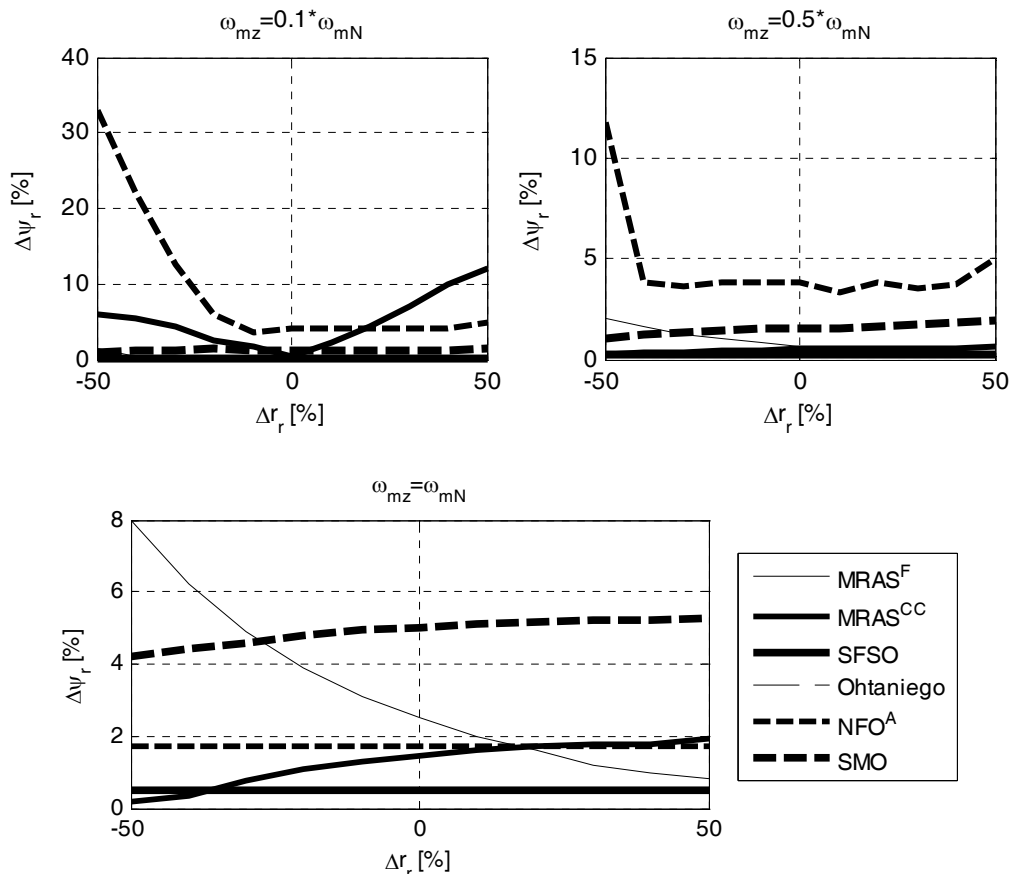
Badania symulacyjne przeprowadzono z zastosowaniem pakietu symulacyjnego Matlab-Simulink[®]. Otrzymane wyniki badań symulacyjnych zostały zgrupowane w zależności od wartości prędkości kątovej zadawanej w układzie sterowania silnika oraz w zależności od wyboru estymowanej wielkości – modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika lub prędkości kątovej wirnika silnika.

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy ilustrujące zależność błędów odtwarzania modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika w funkcji odchyłki wartości rezystancji uzwojenia stojana od wartości znamionowej. Stwierdzono, że szczególnie duże błędy odtwarzania wektora strumienia wirnika występują dla estymatora $SFSO$, Ohtani'ego oraz $MRAS^F$. Z badań wynika również, że przy większych wartościach zadawanej prędkości kątovej silnika występuje zmniejszenie wartości błędów odtwarzania modułu wektora strumienia wirnika.



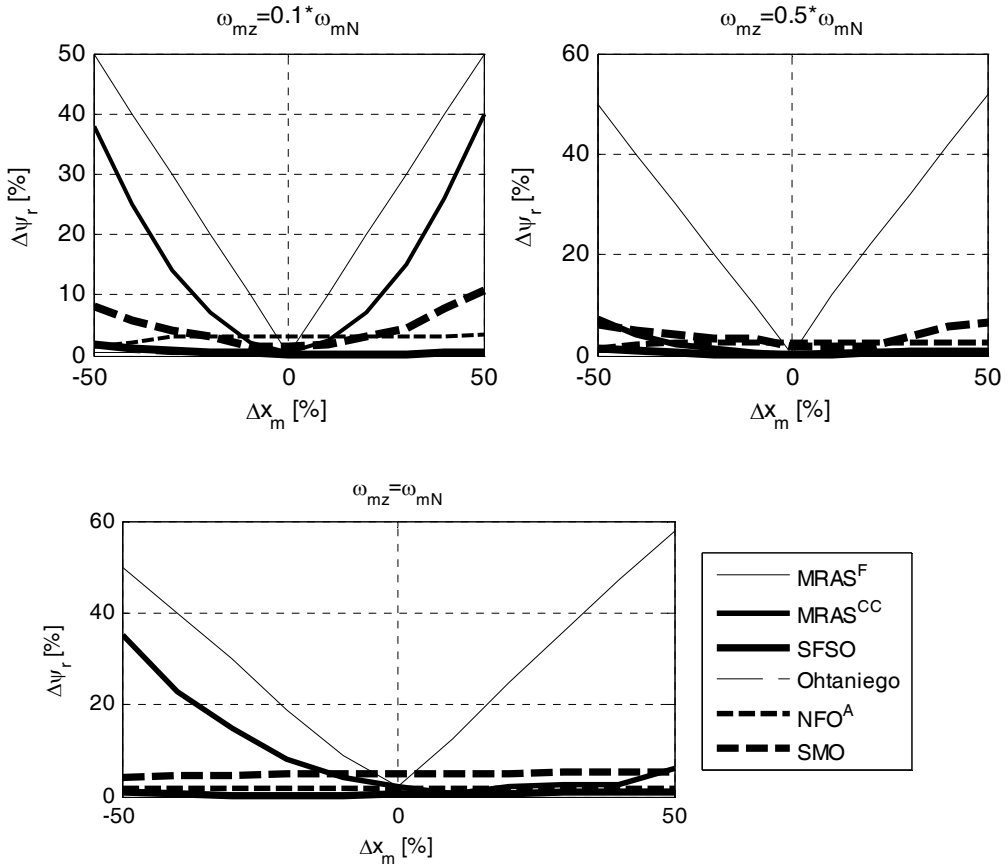
Rys. 3. Przebiegi błędów odtwarzania modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika przez wybrane estymatory przy błędnej identyfikacji rezystancji stojana

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy ilustrujące zależność błędów odtwarzania modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika w funkcji odchyłki od wartości znamionowej wartości fazowej rezystancji uzwojenia wirnika. Z wykonanych badań wynika, że w przypadku przyjęcia małych zadanych wartości prędkości kątownej silnika duże wartości błędów odtwarzania modułu wektora strumienia wirnika występują dla obserwatora pełnego rzędu z adaptacją prędkości oraz dla estymatora $MRAS^{CC}$. W przedziale zadanej względnej prędkości kątownej silnika równej $0 \div 0,5$ wpływ błędnej identyfikacji rezystancji wirnika dla innych rozpatrywanych estymatorów był mały i powodował występowanie błędów estymacji mniejszych od 3%. Dla znamionowej prędkości kątownej silnika występują duże błędy estymacji wektora strumienia wirnika dotyczące układów SMO oraz $MRAS^F$.



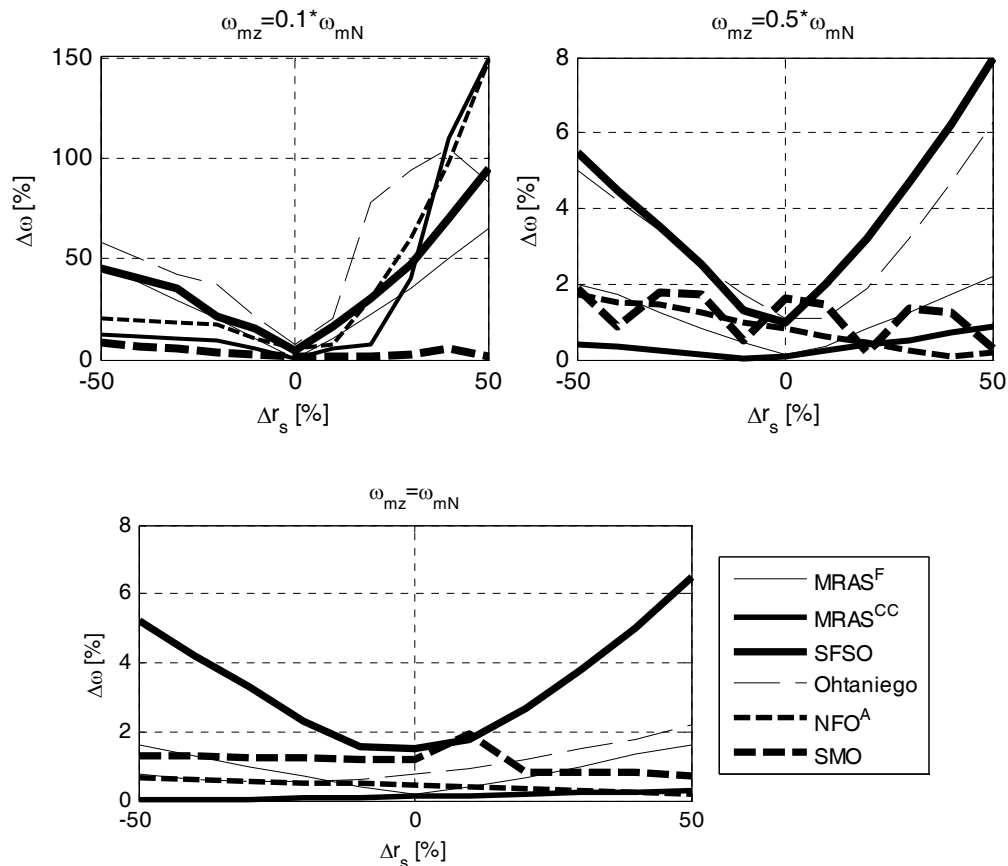
Rys. 4. Przebiegi błędów odtwarzania modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika przez wybrane estymatory przy błędnej identyfikacji rezystancji wirnika

Na rysunku 5 przedstawiono wykresy ilustrujące zależność błędów odtwarzania modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika w funkcji odchyłki od wartości znamionowej reaktancji magnesowania silnika. Wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że najbardziej wrażliwe na zmianę reaktancji magnesowania są estymatory adaptacyjne typu *MRAS*. Pozostałe układy estymatorów wykazywały znacznie mniejszą wrażliwość na zmianę tego parametru. Przeprowadzone badania wykazały, że dla wszystkich przyjętych zadanych wartości prędkości kątowych silnika wartości błędów odtwarzania dla tych układów nie przekraczają 10%.



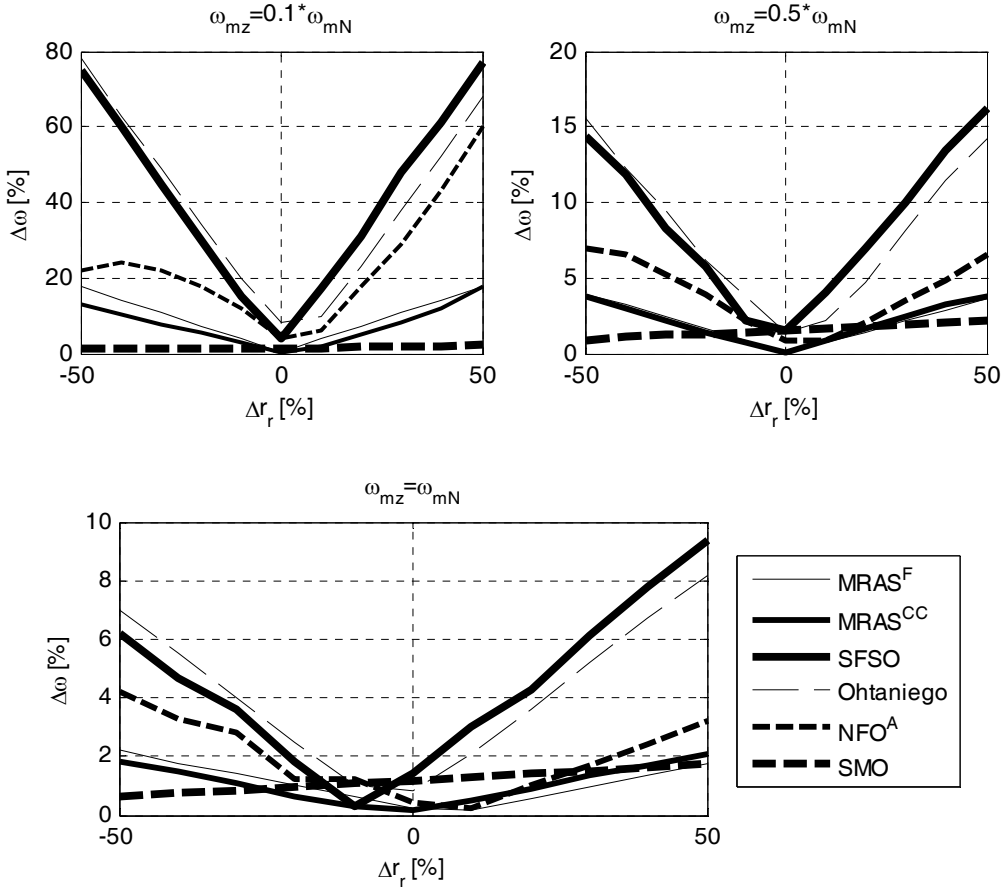
Rys. 5. Przebiegi błędów odtwarzania modułu wektora strumienia sprzężonego wirnika przez wybrane estymatory przy błędnej identyfikacji reaktancji magnesowania

Na rysunku 6 przedstawiono zależność błędów odtwarzania prędkości kątowej silnika w funkcji odchyłki wartości fazowej rezystancji stojana od wartości znamionowej. Z badań wynika, że dla prędkości zadanej na poziomie 0,1 prędkości znamionowej silnika najbardziej wrażliwe na zmianę tego parametru są estymatory: Ohtani'ego, SFSO oraz MRAS^{CC}. Przy dodatnich wartościach odchyłek rezystancji stojana szczególnie duży wpływ tego parametru dotyczy działania estymatora MRAS^{CC} oraz NFO^A, dla których błąd odtwarzania prędkości przyjmuje nawet wartości około 150%. W przypadku zadawania prędkości na poziomie 0,5 oraz równej prędkości znamionowej stwierdzono, że największą wrażliwość wykazuje estymator SFSO. Pozostałe układy estymatorów charakteryzują błędy odtwarzania mniejsze od 2%.



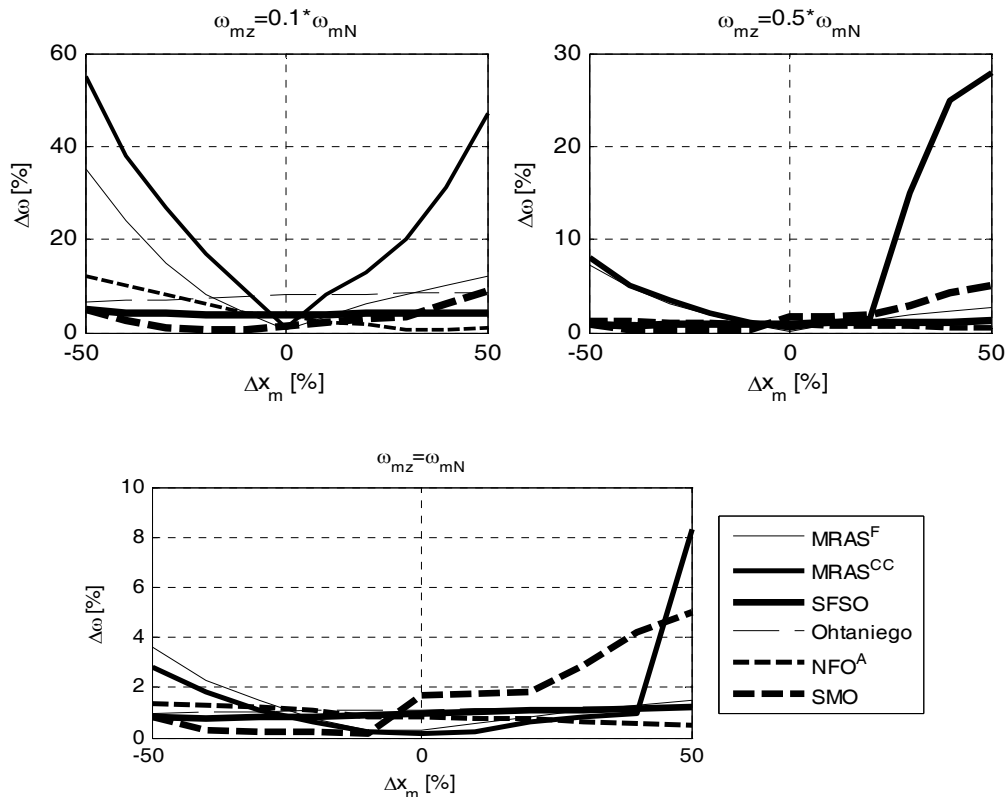
Rys. 6. Przebiegi błędów odtwarzania prędkości kątowej silnika przez wybrane estymatory przy błędnej identyfikacji rezystancji stojana

W dalszej części pracy przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczących analizy wpływu błędnie zidentyfikowanej wartości rezystancji wirnika na estymację zmiennych stanu. Na rysunku 7 przedstawiono wykresy zależności błędów odtwarzania prędkości kątowej w funkcji odchyłki wartości rezystancji wirnika od wartości znamionowej. Z badań wynika, że niezależnie od przyjętej wartości zadanej prędkości kątowej silnika największą wrażliwość na zmiany tego parametru wykazywały estymatory *SFSO* oraz Ohtanięgo. Stwierdzono, że znaczne wartości błędów odtwarzania dotyczą również estymatora *NFO*⁴. Dla prędkości zadanych większych od połowy prędkości znamionowej silnika wpływ zmian rezystancji wirnika na dokładność odtwarzania prędkości przez pozostałe estymatory jest mały, a wartości błędów nie przekraczają 4%.



Rys. 7. Przebiegi błędów odtwarzania prędkości kątowej silnika przez wybrane estymatory przy błędnej identyfikacji rezystancji wirnika

W dalszej części pracy przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczących analizy wpływu błędnie zidentyfikowanej wartości reaktancji magnesowania silnika na estymację zmiennych stanu. Na rysunku 8 przedstawiono wykresy ilustrujące zależność błędów odtwarzania prędkości kątowej w funkcji odchyłki od wartości znamionowej reaktancji magnesowania. Stwierdzono, że odchyłki wartości reaktancji magnesowania mają największy wpływ na dokładność odtwarzania prędkości przez estymatory $MRAS^{CC}$ oraz $MRAS^F$. Dla pozostałych rozważanych estymatorów błędy odtwarzania prędkości kątowej nie przekraczają wartości 5%.



Rys. 8. Przebiegi błędów odtwarzania prędkości kątowej silnika przez wybrane estymatory przy błędnej identyfikacji reaktancji magnesowania

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań wskazują na możliwość stosowania w układach sterowania silnika indukcyjnego algorytmicznych estymatorów zmiennych stanu silnika. Rozpatrywane estymatory charakteryzują się różną wrażliwością na odchyłki parametrów elektromagnetycznych silnika indukcyjnego. Wyniki badań wskazują, że dla wszystkich analizowanych estymatorów największe błędy odtwarzania strumienia wirnika i prędkości kątowej silnika występują dla małych wartości zadawanej prędkości silnika w układzie sterowania.

Układy adaptacyjne $MRAS^{CC}$ oraz $MRAS^F$ wykazują podobną wrażliwość na błędną identyfikację wartości rezystancji stojana i wirnika. Największy błąd występuje dla tych układów w przypadku błędnej identyfikacji reaktancji magnesowania, zarówno w przypadku odtwarzania strumienia wirnika i prędkości kątowej. Obserwator pełnego

rzędu z adaptacją prędkości w przypadku błędnej identyfikacji rezystancji stojana nie wykazywał dużych wartości błędów, w przypadku tego układu największe błędy estymacji występują przy zmianach wartości rezystancji wirnika. Estymator ślizgowy *SMO* wykazuje najmniejsze wartości błędów estymacji dla wszystkich rozpatrywanych stanów pracy układu sterowania.

Znajomość wrażliwości estymatorów na zmienność parametrów elektromagnetycznych silnika jest konieczna przy racjonalnym wyborze odpowiedniej metody odtwarzania zmiennych stanu, dla doboru parametrów układu estymatora oraz dla sprawdzenia zakresu i stabilności pracy układu odtwarzania.

LITERATURA

- [1] ABU-RUB H., OIKONOMOU N., *Sensorless Observer System for Induction Motor Control*, Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008, 30–36.
- [2] DYBKOWSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., TARCHAŁA G., *Analysis of the chosen speed and flux estimators for sensorless induction motor drive*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2011 (dokument elektroniczny): proceedings, Gdańsk, Poland, 27–30 June 2011, 525–530.
- [3] DYBKOWSKI M., TARCHAŁA G., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Experimental analysis of the sensorless traction drive system with DTC-SVM algorithm and MRAS^{CC} estimator*, Przegląd Elektrotechniczny, 88(12a), 2012, 62–65.
- [4] DYBKOWSKI M., *Analiza układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z adaptacyjnymi estymatorami prędkości kątowej*, Rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Wroclawska, 2008.
- [5] DYBKOWSKI M., KAŹMIERKOWSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., STANDO D., *Bezczujnikowe sterowanie falownikowego napędu indukcyjnego dla pojazdów elektrycznych w szerokim zakresie prędkości*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 3, R. 87, 2011, 307–312.
- [6] DYBKOWSKI M., *Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych - zagadnienia wybrane*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wrocław 2013.
- [7] LISTWAN J., *Analiza porównawcza metod estymacji prędkości kątowej dla bezczujnikowego sterowania silnikiem indukcyjnym*, Magisterska praca dyplomowa, Wydział Elektryczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2013.
- [8] OHTANI T., TAKADA N., TANAKA T., *Vector Control of Induction Motor without Shaft Encoder*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 1, 1992, 157–164.
- [9] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, Wrocław 2003.
- [10] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Zastosowanie teorii obserwatorów w napędzie elektrycznym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej, Nr 58, 2005, 5–24.
- [11] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., *Zastosowanie estymatorów typu MRAS do odtwarzania strumienia i prędkości wirnika oraz parametrów uzwojenia stojana w bezczujnikowym napędzie indukcyjnym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej, Nr 62, 2008, 362–371.
- [12] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., TARCHAŁA G., *Analiza wybranych struktur estymacji prędkości kątowej w napędach z silnikami indukcyjnymi. Część I. Modele matematyczne*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej, Nr 64, 2010, 151–161.

- [13] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., TARCHAŁA G., *Analiza wybranych struktur estymacji prędkości kątowej w napędach z silnikami indukcyjnymi. Część II. Badania*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 64, 2010, 162–175.
- [14] UTKIN V., YAN Z., *Sliding Mode Observers for Electric Machines – an Overview*, Proc. of the 28th Annual Conf. of the Industrial Electronics Society IECON '2002, Vol. 3, No. 2, 1842–1847.

SENSITIVITY ANALYSIS OF SELECTED STATE VARIABLE ESTIMATORS
FOR IMPROPER IDENTIFICATION OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS
OF AN INDUCTION MOTOR

The paper presents a sensitivity analysis of selected estimators of rotor flux and speed of induction motor. Verification of estimator sensitivity has been carried out on the base of the drive system controlled with the application of DTC-SVM control. This control system has been simulated in Matlab-Simulink. The study was conducted for different angular speed of the motor. The effect of improper identification of the stator resistance, rotor resistance and magnetizing reactance has been studied. This analysis can be helpful for selection of suitable estimators for the sensorless system of induction motor drive.